

УДК 624.04:593.3

Є.О. Суржан, К.О. Рапіна, І.М. Дем'яненко

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
Україна*

КОНСТРУКТИВНА РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛЕВОЇ СТРУКТУРНОЇ ПЛИТИ ПОКРИТТЯ

Ця стаття присвячена питанню оптимізації витрат сталі двох-поєсними гратчастими просторовими структурними плитами системи СТіСК. Основою зменшення питомих витрат сталі становить проектування конструкції базуючись на оптимальних параметрах, таких як положення опор, геометричні показники конструкції та ін. Стаття має на меті пошук таких параметрів для системи СТіСК, а також їх теоретичну верифікацію. У праці також розглянуті деякі аспекти використання ВІМ-технологій, та їх використання при проектуванні.

Ключові слова: раціоналізація, пасивне управління конструкцією, витрати сталі, структурні металеві плити покриття, ВІМ-технології.

Постановка проблеми

Останнім часом у цивільному будівництві спостерігається значне збільшення обсягів використання сталезалізобетонних та сталевих структурних плит перекриття та покриття [1]. Даний феномен пояснюється цілим рядом переваг таких конструкцій:

- Відносна мала будівельна висота у порівнянні з прольотом;
- Простий напружено-деформований стан у конструкціях;
- Можливість прокладання інженерних комунікацій у плитах;
- Підвищена стійкість до прогресуючого руйнування [2,3];
- Простота улаштування перекриття та покриття завдяки невеликому кроку вузлів;
- Високий рівень заводської готовності;
- Архітектурна виразність.

На даний момент відомий цілий ряд структурних покриттів («ЦНИИСК», «Кисловодськ», та ін.), проте вони мають один суттєвий недолік – складність виготовлення та монтажу. Розроблена в Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова під керівництвом професора В.С. Шмуклера система СТіСК (структури і складки) вирішує цю проблему [4, 5]. Це підтверджується також на практиці активним застосуванням системи СТіСК при будівництві багатьох об'єктів в м. Харкові (рис.1). Тому, подальше вдосконалення конструктиву дозволить розширити можливості з його використання.

До сьогодні, зазначена конструктивна система використовувалась переважно з опиранням на два повздовжніх контури, що є фактично роботою за балочною схемою.

Проте, вважається можливим за рахунок конструктивної раціоналізації структурної плити покриття забезпечити її просторову роботу та досягти зменшення витрат сталі. Це, в свою чергу, потребує детального дослідження, і відкриває значні можливості до подальшого вдосконалення.



Рис.1. Приклади використання системи СТіСК

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання раціоналізації просторових сталевих конструкцій розглянуто в роботах вітчизняних вчених, таких як: В.В. Трофимович, В.О. Пермяков, В.М. Шимановський, В.М. Гордєєв, М.Л. Гринберг В.С Шмуклер та ін.

Загалом питання підвищення ефективності роботи структурних плит розглянуто закордонними

науковцями: В.І. Трофімов, Б.А. Міронков, Л.Н. Лубо, Н. Fentiman, Н. Walker, S. Hsiao, S. Polonyi, M. Van Binst та багато ін.

Потрібно зазначити, що загальні принципи у цій галузі давно сформовані. Проте кожна конструктивна система має свої специфічні риси, що потребує в кожному окремому випадку більш детального дослідження.

Тому, спираючись на відомий базис, можна провести адресне дослідження із вдосконалення конструктиву системи СТіСК.

Мета даної праці - оптимізація витрат сталі завдяки ефекту перерозподілу внутрішніх зусиль у системі СТіСК.

Виклад основного матеріалу

У якості вихідних даних, спрощень та початкових допущень у даній статті прийняте наступне:

- Розміри структури в плані 18x17,28 (м);
- Висота структурної плити прийнято 0,75 м (1/25 довжини прольоту);
- Пояси прийняті із парних кутків;
- Елементи решітки прийняті із профільних квадратних труб;
- Навантаження на структуру прийняте вузлове в еквіваленті 675 кН/м²;
- Граничні умови опирання – нерухомий шарнір;
- Внутрішньоконтурне опирання, та консольні звиси не розглядалися.

Застосування BIM-технологій у дослідженні

При проведенні аналізу великої кількості різних за геометрією варіантів розрахункових схем, звичайно, багато часу потребує створення відповідних розрахункових схем для подальшого їх аналізу в програмних комплексах із допомогою методу скінчених елементів. Для вирішення завдання цієї статті автори використали параметричне моделювання у середовищі Dynamo 1.3.0. Це стало можливим завдяки властивостям системи СТіСК, яка складається із модульних елементів та будується навколо обмеженої кількості параметрів. Це означає, що, змінюючи ці вихідні параметри можливо отримати необхідну розрахункову схему в автоматичному режимі.

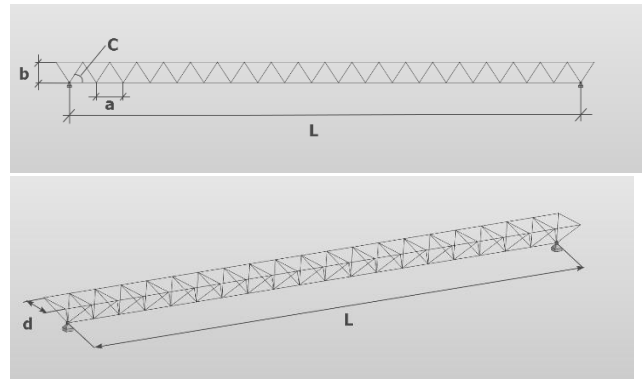


Рис. 2. Основні параметри конструкції

До таких параметрів слід віднести:

- L- довжину модульного елемента;
- c - Кут нахилу елементів решітки у модульному елементі;
- a - Крок вузлів у модульному елементі;
- d - крок вузлів у поясах у напрямку перпендикулярному до напрямку основного прольоту.

Базуючись на цих параметрах алгоритм мав наступну логіку. По-перше визначалась необхідна довжина (L) модульного елемента, ґрунтуючись на поставленій задачі, та його висота у складі конструкції. Вона напряму залежить від прольоту (1/25 L). Потім визначається кут нахилу стержнів у фермах (c) і розраховується параметр «a». З ферм, утворюється елементарний структурний елемент (дві ферми під кутом 45°), які при цьому мають одну спільну сторону, а інші поєднанні прогонами.

Після створення розрахункової схеми направляємо її до Autodesk Robot. Де виконуємо аналіз. У процесі реального проектування також можливі і подальші кроки. Наприклад, після розрахунку, завдяки алгоритму написаному у Dynamo 1.3.0, можливо також назначити необхідні профілі для кожного з елементів для попереднього розрахунку, і експортувати схему до Autodesk Revit для конструювання. Або одразу після розрахунку у Autodesk Robot із визначеними профілями експортувати схему до Autodesk Revit.

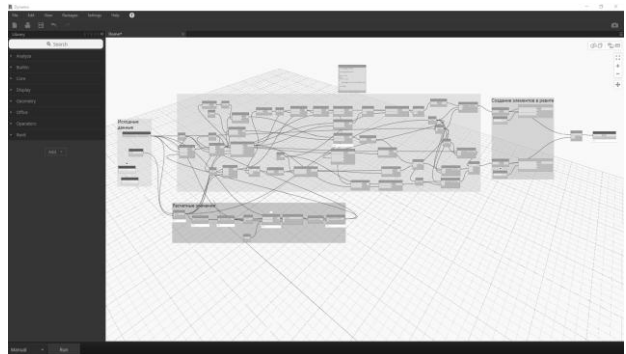


Рис. 3. Графічне відображення алгоритму створення розрахункової схеми у Dynamo 1.3.0

Конструктивна раціоналізація

Стосовно раціоналізації конструкції, передбачалось за рахунок ефективного розташування опор отримати перерозподіл внутрішніх зусиль який дозволить зменшити витрати сталі.

По-перше слід зазначити, що в переважній більшості випадків структурні плити системи СТіСК спиралися лише на дві сторони перпендикулярні до основного прольоту. Що фактично є роботою складки. При цьому, аналіз в ПК Autodesk Robot та у ПК Ліра показав, що прогони по верхньому та нижньому поясах не беруть участь в спільній роботі, вони виконують лише огорожуючі функції.

Передбачається, що при просторовій роботі структури, максимальні зусилля у поясах стануть значно менші, а в свою чергу за рахунок перерозподілу в прогонах з'являться зусилля еквівалентні поясам.

При цьому розподіл зусиль вздовж поясу має стати більш рівномірним, у порівнянні із складкою, що повинно призвести до більш ефективного використання матеріалу елементів [6], та до збільшення уніфікації.

На початковому етапі було більш детально проаналізовано роботу системи при опиранні на 2 контури. Жорсткості елементів були назначені однаковими для прогонів і для поясів. Проте, це не призвело до принципіальної зміни характеру роботи конструкції. Результати розрахунків наведені на рис. 4-5. Подальше збільшення жорсткості прогонів також не призводило до бажаних результатів.

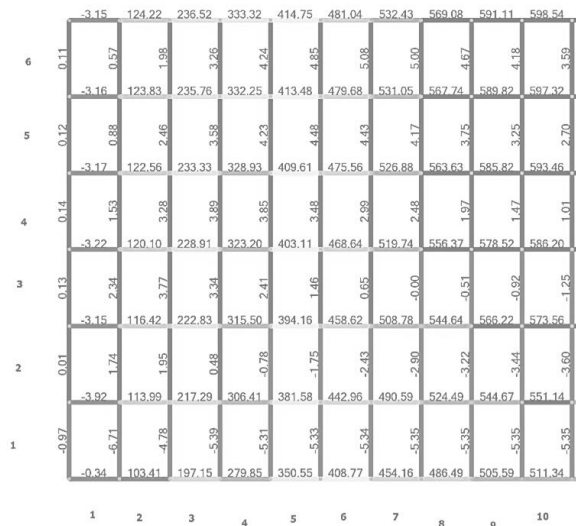


Рис. 4. Фрагмент діаграми зусиль у нижній зоні структури (кН) при опиранні на 2 контури

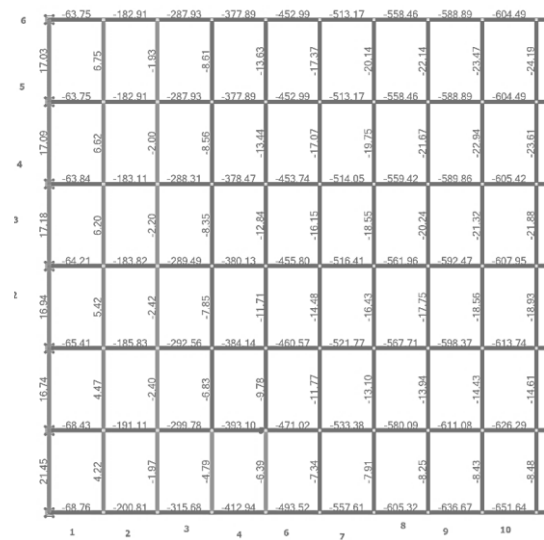


Рис. 5. Фрагмент діаграми зусиль у верхній зоні структури (кН) при опиранні на 2 контури

Тому, наступним кроком була зміна схеми опирання конструкції. Згідно з посібником «ЦНИИСК ім. Кучеренко» по проектуванню структурних конструкцій [7], ключовим моментом у роботі структури є спосіб опирання конструкції, та форма в плані. Це також підтверджується науковими працями стосовно пластинок та оболонки, які у багатьох випадках використовують для оцінки характеру роботи структурних плит [8,9].

Серед варіантів спирання структурних плит розрізняють:

- Контурне;
- Внутрішньоконтурне;
- Змішане.

В більшості випадків система СТіСК є покриттям всієї будівлі, тому існує можливість опирання конструкції по контуру. В нашому випадку, для можливості порівняння із складкою прийнято до уваги лише розташування опор по периметру. При цьому контурним будемо вважати таке розташування опор при якому з кожної сторони є не менш трьох точок.

При суцільному спиранні нижнього поясу очевидна просторова робота конструкції. (рис. 6)

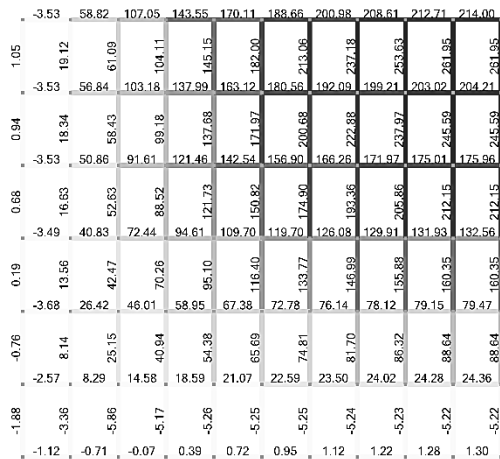


Рис. 6. Фрагмент діаграми зусиль у верхній зоні структури (кН) при суцільному контурному опиранні

Але опирання із кроком вузлів 1,44 - 1,8 м накладає суттєві архітектурно-планувальні обмеження, та суттєво ускладнює монтаж. Тому є доцільним розглянути варіант із прорідженим кроком опор.

Згідно із [7], до кроків опор $\frac{1}{4}$ прольоту (включно) структурні плити зберігають позитивні властивості характерні для контурного опирання.

Було проаналізовано кроки опор $\frac{1}{3} L$, $\frac{1}{4} L$, $\frac{1}{5} L$ ($\frac{1}{6} L$ – фактично є суцільним спиранням). При цьому, потрібно приймати до уваги, що крок відносно двох різних напрямків – теж різний. Це у першу чергу пов'язано із особливостями формоутворення системи СТіСК. Так у нашому випадку довжина панелі верхнього поясу у напрямку основного прольоту і у перпендикулярному становить – 1,44 м та 1,8 м відповідно. При цьому, для симетричного розміщення опор, у деяких випадках використовувались спирання одразу у двох вузлах, замість одного.

Найсприятливішим із точки зору витрат матеріалу є схема із кроком опор близьким до $\frac{1}{4}$ від прольоту. Результати розрахунків наведені нижче (рис. 7-8).

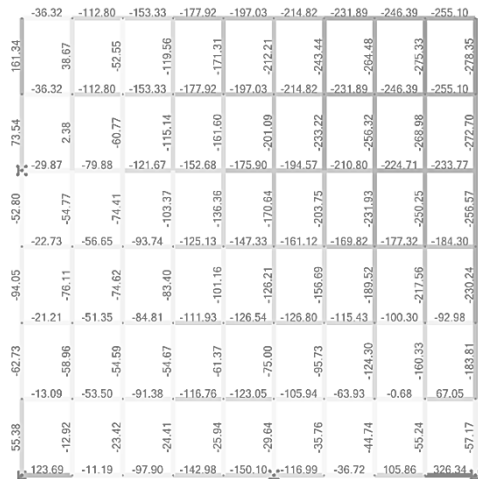


Рис. 7. Фрагмент діаграми зусиль у нижній зоні структури (кН) при контурному опиранні (крок опор $\frac{1}{4} L$)

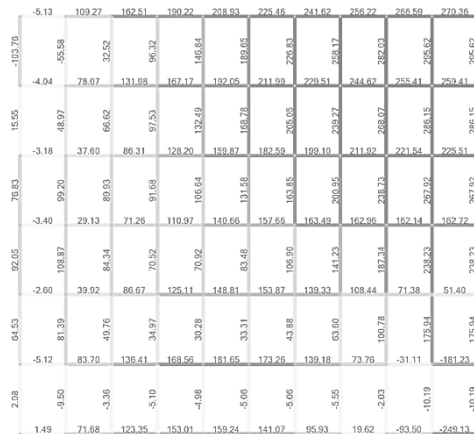


Рис. 8. Фрагмент діаграми зусиль у верхній зоні структури (кН) при контурному опиранні (крок опор $\frac{1}{4} L$)

При розрідженні опор зусилля у поясах збільшились в середньому на 25%, а над опорами збільшились локальні ефекти у місцях кріплення.

Висновки

Завдяки пасивному управлінню конструкцією можливо досягти перерозподілу зусиль у структурній плиті системи СТіСК, завдяки просторовій роботі. По попереднім оцінкам завдяки цьому досягається економія матеріалу 15-20%. Це стає можливим за рахунок розвантаження поясів та поєднання функції несучих та огорожуючих конструкцій для прогонів. При цьому передбачені рішення не впливають на архітектурно-планувальну композицію [10].

З урахуванням отриманих результатів, для подальшого дослідження з'являється одразу декілька напрямків, які продовжують розпочаті раніше дослідження [11].

По-перше, наступним кроком необхідно дослідити можливість вирівнювання зусиль у двох напрямках, за рахунок зміни жорсткостей. Це, на додачу, призведе до поліпшення просторової роботи і зменшення локальних явищ у приопорних зонах.

По-друге – необхідно визначити вплив форми у плані на роботу конструкції. Для оболонок та пластинок з відповідними параметрами співвідношення сторін грає значну роль.

Література

1. De Silva, S. & Thambiratnam, D. P. (2009). Dynamic characteristics of steel-deck composite floors under human-induced loads. *Computers & Structures*, 87(17), 1067-1076.
2. DING, Y., LIN, W., & LI, Z. X. (2007). Non-stationary Random Seismic Analysis of Long-span Spatial Structures under Multi-support and Multi-dimensional Earthquake Excitations [J]. *Engineering Mechanics*, 3, 97-101.
3. Alashker, Y., El-Tawil, S., & Sadek, F. (2010). Progressive collapse resistance of steel - concrete composite floors. *Journal of Structural Engineering*, 136(10), 1187-1196.
4. Буряк, Ю.П. Патент України 84560 [Текст] / Ю.П. Буряк, А.І. Дюкер, І. Вассім.
5. Шмуклер, В. С. Металобетонное перекрытие с рациональными параметрами [Текст] / Шмуклер, В. С. и др. // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2010. – №. 49
6. Трофимович, В.В. Оптимизация металлических конструкций [Текст] / В.В. Трофимович, В.А. Пермяков, – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 200 с.
7. Рекомендации по проектированию структурных конструкций, ЦНИИСК им. Кучеренко [Текст]. - М., 1984.-298 с.
8. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки [Текст]/ С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер – 1966.
9. Вайнберг, Д. В. Расчет пластин [Текст] /Д.В. Вайнберг, Е.Д. Вайнберг//Киев. Будивельник. – 1970.
10. Энгель, Х. Несущие системы [Текст]/ Хайно Энгель; предисл. Ральфа Рансона; пер. с нем. ЛА Андреевой //М.: АСТ: Астрель. – 2007. – С. 344.
11. Surzhan, Y., Rapina, K., & Rapina, T. (2017). Parameters rationalization for flat double-layer grid spatial structure (STiSK system). In *MATEC Web of Conferences*(Vol. 116, p. 02033). EDP Sciences.

References

1. De Silva, S. S., & Thambiratnam, D. P. (2009). Dynamic characteristics of steel-deck composite floors under human-induced loads. *Computers & Structures*, 87(17), 1067-1076.

STRUCTURAL RATIONALIZATION FOR FLAT DOUBLE-LAYER GRID SPATIAL STRUCTURE

Y.Surzhan, K. Rapina, I. Demyanenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy, Ukraine

It is the initial paper in rationalization of steel consumption for flat double-layer grid spatial structure of STiSK system. Main principles of the system were described. Optimal geometry parameters and supports location are under consideration and their influence on a stress-strain state. It is possible to reduce metal consumption in some cases with original design. That would help keep system cheap and with good level of prefabrication readiness. Some vital aspects related to the structure BIM design are clarified as well. Outcomes of the paper can be helpful for manufacturers of metal structures as well, and can help them to build up smart life-cycle designs (from engineer's idea to maintenance).

Keywords: rationalization, passive design control, consumption of steel, structural slabs, BIM-technology

2. DING, Y., LIN, W., & LI, Z. X. (2007). Non-stationary Random Seismic Analysis of Long-span Spatial Structures under Multi-support and Multi-dimensional Earthquake Excitations [J]. *Engineering Mechanics*, 3, 97-101.
3. Burak ,Y..P., Duker, A.I., Vassim,I. Patent of Ukraine 84560c
4. Alashker, Y., El-Tawil, S., & Sadek, F. (2010). Progressive collapse resistance of steel-concrete composite floors. *Journal of Structural Engineering*, 136(10), 1187-1196.
5. Berezhnaya, E.V, & Steblevsky, I.A (2013). Analysis of the results of the second stage of full-scale tests of structural-monotropic reinforced concrete overlap. *Budivelni konstruktiï*, (79), 347-354.
6. Trofimovich, VV, & Permyakov, V.A (1983). Optimization of metal structures. K .: Vishcha shkola, 210.
7. Recommendations for the design of structural structures, CNIISK them. Kucherenko, M., 1984,-298.
8. Timoshenko, S. P., & Woinowsky - Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. Mc Graw-hill.
9. Weinberg, D.V, & Weinberg, E.D (1970). Calculation of the plate.-2 nd ed., Revised. and additional. Kiev: Budyvelnik.
10. Engel H. Carrying systems. - Moscow: AST: Astrel, 2007, - 344.
11. Surzhan, Y., Rapina, K., & Rapina, T. (2017). Parameters rationalization for flat double-layer grid spatial structure (STiSK system). In *MATEC Web of Conferences*(Vol. 116, p. 02033). EDP Sciences.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: СУРЖАН Євген Олександрович
Аспірант

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – evgenijsurzhan@gmail.com

Автор: РАПІНА Костянтин Олексійович
кандидат технічних наук, доцент.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – rapina.ua@gmail.com

Автор: ДЕМ'ЯНЕНКО Іван Миколайович
магістр

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – ivan.demyanenko.1995@gmail.com